

A korszakalkotó csillagászati űrtávcsövek listáján valószínűleg előkelő helyen szereplő *Kepler-teleszkóp* egy nemzedékeken átívelő sikertörténet főszereplőjeként alapjaiban változtatta meg a Naprendszeren kívüli planétákról alkotott nézeteinket. Kulcsfontosságú szerepe ugyan kétségtelen az exobolygók világának megismerésében és kiterjesztésében, jelentősége azonban nem szűkíthető be annak határai közé. Majd évtizedes küldetése során a Kepler – többek között – változócsillagokat, szupernóvákat, aktív galaxismagokat és naprendszerbeli égitesteket egyaránt vizsgált. Lehetetlen lenne áttekinteni azt a rengeteg tudományos cikket, amelyek megszületését a Kepler 2018 novemberéig tartó megfigyelési tettek lehetővé. A továbbiakban kiterjedt tudományos repertoárjának fontosabb pontjait ismerhetjük meg. Mindezek előtt érdemes áttekinteni, mi tette lehetővé, hogy a Kepler elérje a korábban példátlan teljesítményt.

Egy új korszak kezdete

A Kepler 2009. márciusi világűrbe juttatását – más NASA-projektekhez hasonlóan – több, mint egy évtizedes előkészületi munkálatok előzték meg. Nagyon téved az, aki úgy gondolja, a sikerhez vezető út sima és egyenes – a Kepler-projektet vezető *William Boruckinak* és csapatának is sok buktatón kellett átverekedni magát, míg javaslatukat végül elfogadták [1]. A Kepler eleinte inkább optimista fantasztikumnak tűnt, mint potenciálisan megvalósítható tudományos úreszköznek. Azonban a korábban lehetetlennek ítélt küldetés – a technológia fejlődésének hála – az új évezred beköszöntével mégis szabad utat kapott, és hamarosan megkezdhetette tudományos vizsgálatait.

A Kepler fő profilja egyértelműen a más csillagok körül keringő exobolygók felfedezése, azon belül is a Földhöz hasonló kőzetbolygók arányának meghatározása volt. A küldetés arra a kérdésre is próbált választ találni, hogy mennyire gyakoriak az ilyen típusú bolygók a Naphoz hasonló sárga törpecsillagok körül. Ezek mellett természetesen további, a Jupiterhez hasonló gázbolygók detektálását is várták a távcsőtől; valamint a csillagok belső szerkezetének feltérképezése.



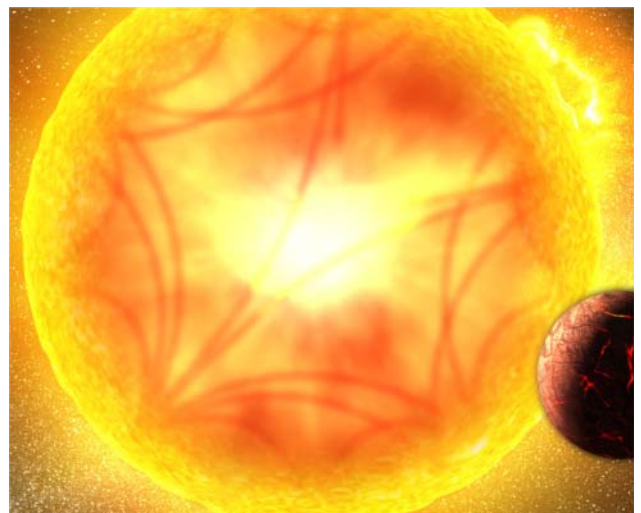
Boldog Ádám exobolygász. A csillagászat iránti szeretetet – mint valószínűleg sokan mások – a science fictionnek köszönheti. Ez is motiválta, hogy kutatási területként a tudományos-fantasztikumhoz jelenleg legközelebb álló témát válasszon: a Föld-típusú exobolygók lakhatóságának vizsgálatát. Jelenleg a TRAPPIST-1 rendszer planétáinak mágneses terét igyekszik kiszámítani, hogy kiderítse, milyen mértékű védelmet nyújtanak a bolygók számára.

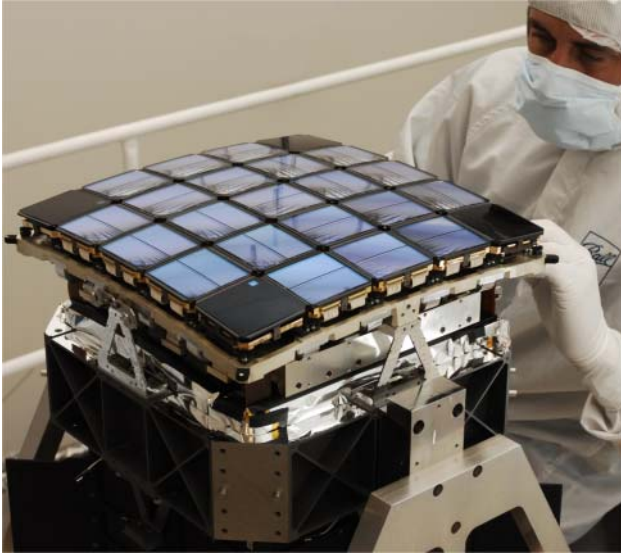


A Kepler-űrtávcső (forrás: NASA Ames, JPL Caltech).

zése az *asztroszeizmológia* módszerével szintén a Kepler feladatkörébe tartozott – először csak mint a bolygók gazdacsillagai jobb megismerésének kiegészítő eszköze, később önálló, épp a Kepler (és korábban az európai CoRoT) segítségével megszülető tudományágként. Ennek lényege, hogy a csillag belső szerkezetéről annak „csillagregnései” hordoznak információt (csakúgy, mint bolygónk esetében a földrengések), amelyek a csillag fényességének kismértékű változásában nyilvánulnak meg (1. ábra). A csillag rezgése által generált hullámok terjedésének sebessége függ a hullám típusától, valamint azon közeg sűrűségétől, amelyen áthalad [1]. Csillagok esetén kétféle hullámtípust különböztetünk meg: a csillagok külső rétegeiben bekövetkező változásra érzékenyebb *p-módusokat*, illetve a belső, a csillag magjához közeli régióról információt hordozó *g-módusokat*. Az oszcillációs módusok elnevezése azok természetére utal: a „p” az angol *pressure*, a „g” pedig a *gravity* szóból ered

1. ábra. A csillagokban terjedő és felszínüket elérő rezgések információt hordoznak a csillagok belsejéről (forrás: G. P. Diaz/IAC).





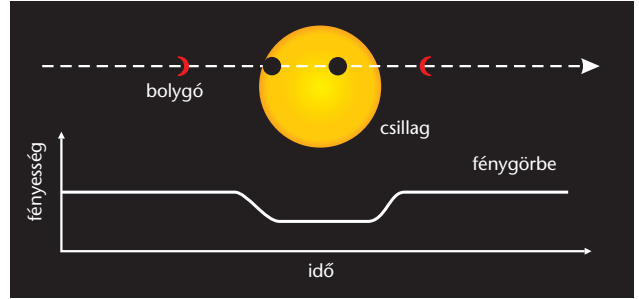
2. ábra. A Kepler-űrtávcső detektorrendszere a laboratóriumban (forrás: NASA, Ball Aerospace).

(nem azonos a gravitációs hullámokkal [*gravitational waves*!]). Mivel a csillagokban jelen lévő nyomási hullám a hanghullám, a p-módusú hullámokat szokás akusztikus oszcillációknak is nevezni. Ebben az esetben a csillaggáz összenyomását és tágulását a konvekció által gerjesztett rezgések keltik. A Naphoz hasonló típusú és vörös óriás – vagyis kiterjedt konvekciós zónát tartalmazó – csillagok esetében a bennük terjedő hanghullámok a csillagot pulzációra kényszerítik. A g-módusú rezgések esetében a visszatérítő erő szerepét nem a nyomás, hanem a felhajtóerő tölti be. Az asztroszeizmológia módszere ezen hullámok felszíni oszcillációinak alapján képes megközelítést adni a csillagok sugarára, tömegére és korára is.

A küldetés eszköze

A Kepler 1,4 méter átmérőjű, Schmidt-típusú tükrös távcsöve az égbolt 105 négyzetfokos területét vizsgálta. A misszió első 4 évében a Kepler a Tejútól északra, a Hattyú és a Lant csillagkép határán húzódó területet tartotta folyamatos megfigyelés alatt. Látómezejében egyszerre 150 000 csillag fényességét mérte. A célterület kiválasztásában fontos szempont volt, hogy az az ekliptikán kívül essen, ezáltal egész évben megfigyelhető legyen.

A távcső célja az exobolygók fotometriai úton történő detektálása volt. Amikor egy bolygó elhalad csillaga előtt, kitakarja annak egy részét. Ezt a csillag fényességének csökkenéseként érzékeljük abban az esetben, ha a bolygópálya síkja közel a látóirányunkba esik. Ahhoz, hogy egy Föld méretű kőzetbolygó által okozott fényességcsökkenést érzékeljünk egy Nap-típusú csillag körül, 10^{-5} – 10^{-6} relatív pontosságú fotometriai eszközre van szükségünk. A Kepler 42 darab CCD-ből összeállított detektora képes volt ilyen mértékű precizitásra (2. ábra). Ez a rendkívüli pontosság tette lehetővé azt is, hogy a csillagok belső



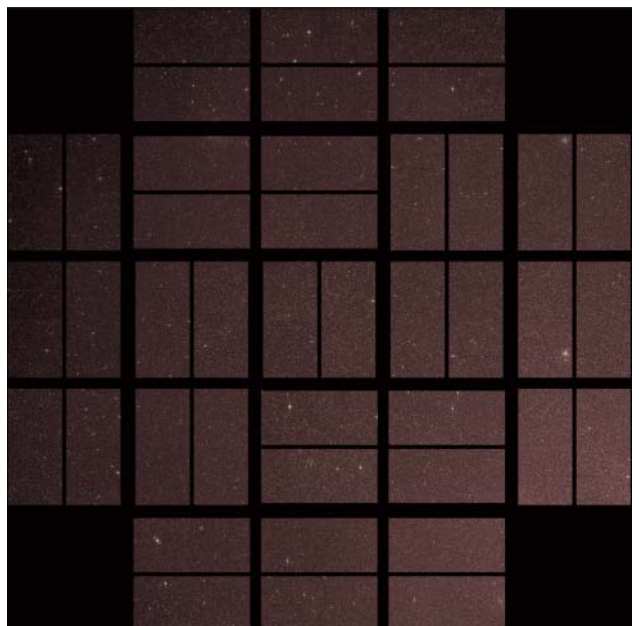
3. ábra. Az exobolygó a *tranzit* során kitakarja a csillagkorong egy részét, ami a rendszer fényességének csökkenését okozza (forrás: NASA Ames).

szerkezetét is vizsgálni lehessen [1]. A Kepler heliocentrikus pályán keringett 372,5 napos periódussal, energiaellátása napelemek segítségével történt. Azért, hogy ezeket folyamatosan fény érje, a teleszkópot negyedévente elforgatták 90 fokkal a látóirány mentén. A távcső így ugyanazt a területet figyelhette egész évben, pusztán az változott háromhavonta, hogy melyik CCD-egység méri az égbolt adott részét.

A sárga köves út – a Kepler első négy éve

A Kepler az exobolygók felfedezésére a *tranzitmódszert* alkalmazta [2]. Egy csillag fényességének periodikusan visszatérő csökkenéséből következtethetünk egy körülötte keringő bolygóra (3. ábra). Ez a fényességcsökkenés a Földről csak akkor észlelhető, ha a bolygópálya kedvezően áll (ha inklinációja közel 90 fokos), vagyis keringése során elhalad a csillaga és a Föld között. Emiatt az ilyen típusú detektálási mód elsősorban a csillagokhoz közel keringő bolygók felfedezésére érzékeny. Minél távolabb kering egy exobolygó csillagától, annál kisebb valószínűséggel áll fenn a kedvező pályakonfiguráció.

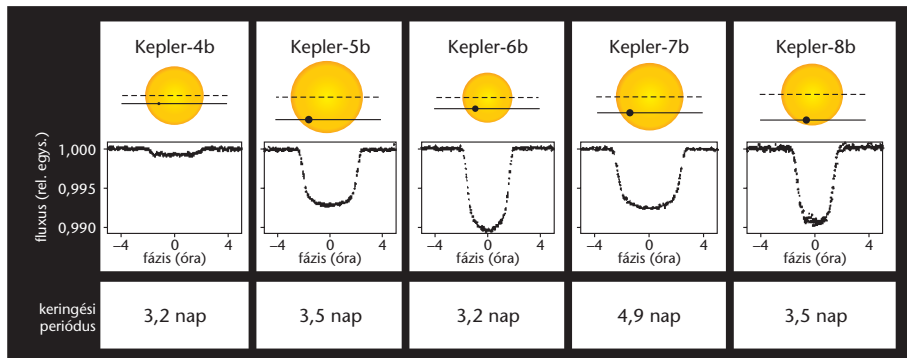
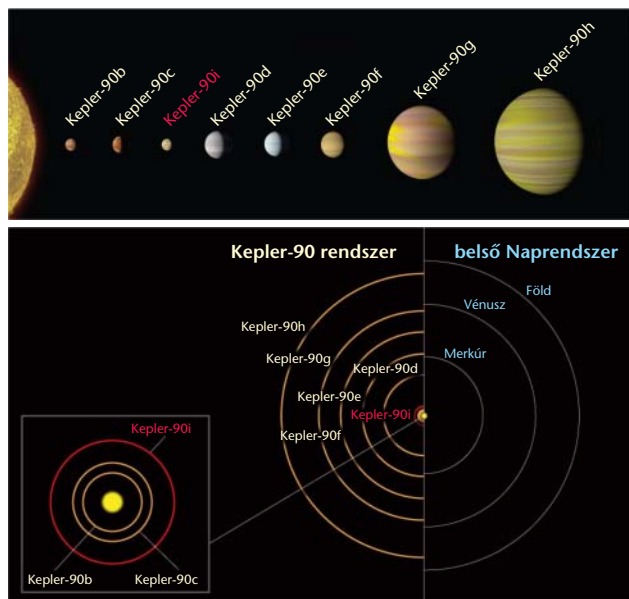
4. ábra. A Kepler első képe (forrás: NASA/Ames/J. Jenkins).



A Kepler első képe 2009 áprilisában született (4. ábra), és nem kellett sokáig várni az első felfedezésre sem. 2010 januárja jelentette a jég megtörését: a távcső által detektált első exoplanéta egy Jupiter típusú gázóriás volt (5. ábra). Egy év múlva sor került az első kőzetbolygó felfedezésére is: ez volt a Kepler-10b. A Kepler ezt követően szinte „futószalagon” szállította az újabb exobolygókat: az első kettőscsillag körül keringő bolygót 2011-ben fedezte fel (Kepler-16b [3]), amelyet később több (a Csillagok háborújából ismert bolygó mintájára tatóoine-oknak keresztelt) hasonló égitest követett. Ugyanazon év decemberében felfedezte első, egy csillag lakhatósági zónájában keringő bolygóját is.

A Kepler mérési adatai alapján rengeteg új ismeretet szereztünk a bolygórendszerek világával kapcsolatban: konvenciók dőltek meg, új hipotézisek születtek; meglepő eredmények hada került át a köztudatba. Kiderült, hogy az exobolygók nem pusztán gyakoriak a galaxisunkban, de számuk még a csillagokét is felülmúlja. A korábbi elképzelésekkel ellentétben arra is fény derült, hogy a Földhöz hasonló típusú kőzetbolygók szintén nagy számmal találhatóak más csillagok körül. A Kepler által elérhetővé vált pontosság nélkül korábban elsősorban a nagy tömegű gázóriások felfedezése dominált, ez a kiválasztási effektus pedig erősen befolyásolta az exobolygókkal kapcsolatos feltételezéseinket.

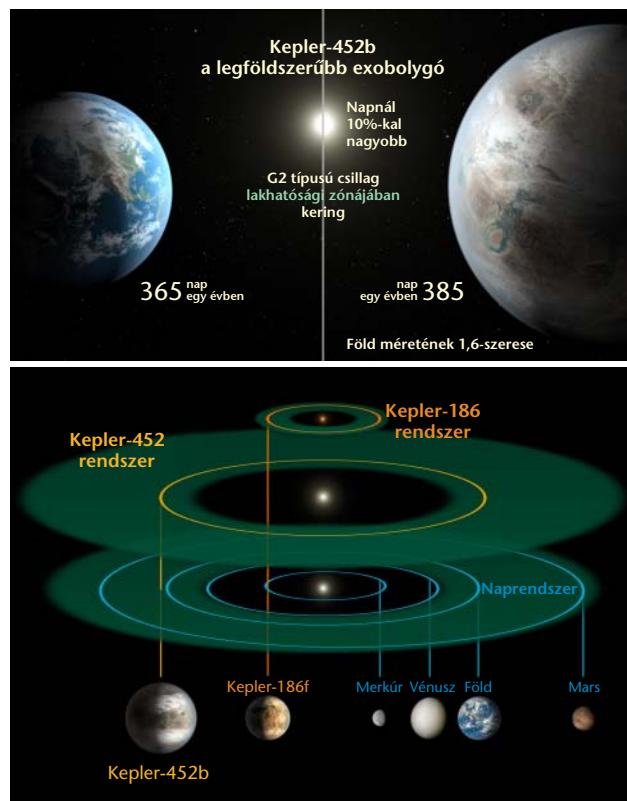
6. ábra. A legtöbb planétát tartalmazó ismert exobolygórendszer, a Kepler-90 bolygói és azok pályái. A rendszer igen kompakt, legtovábbi bolygója is 1 csillagászati egységben belül kering (forrás: NASA/Ames Research Center/W. Stenzel).

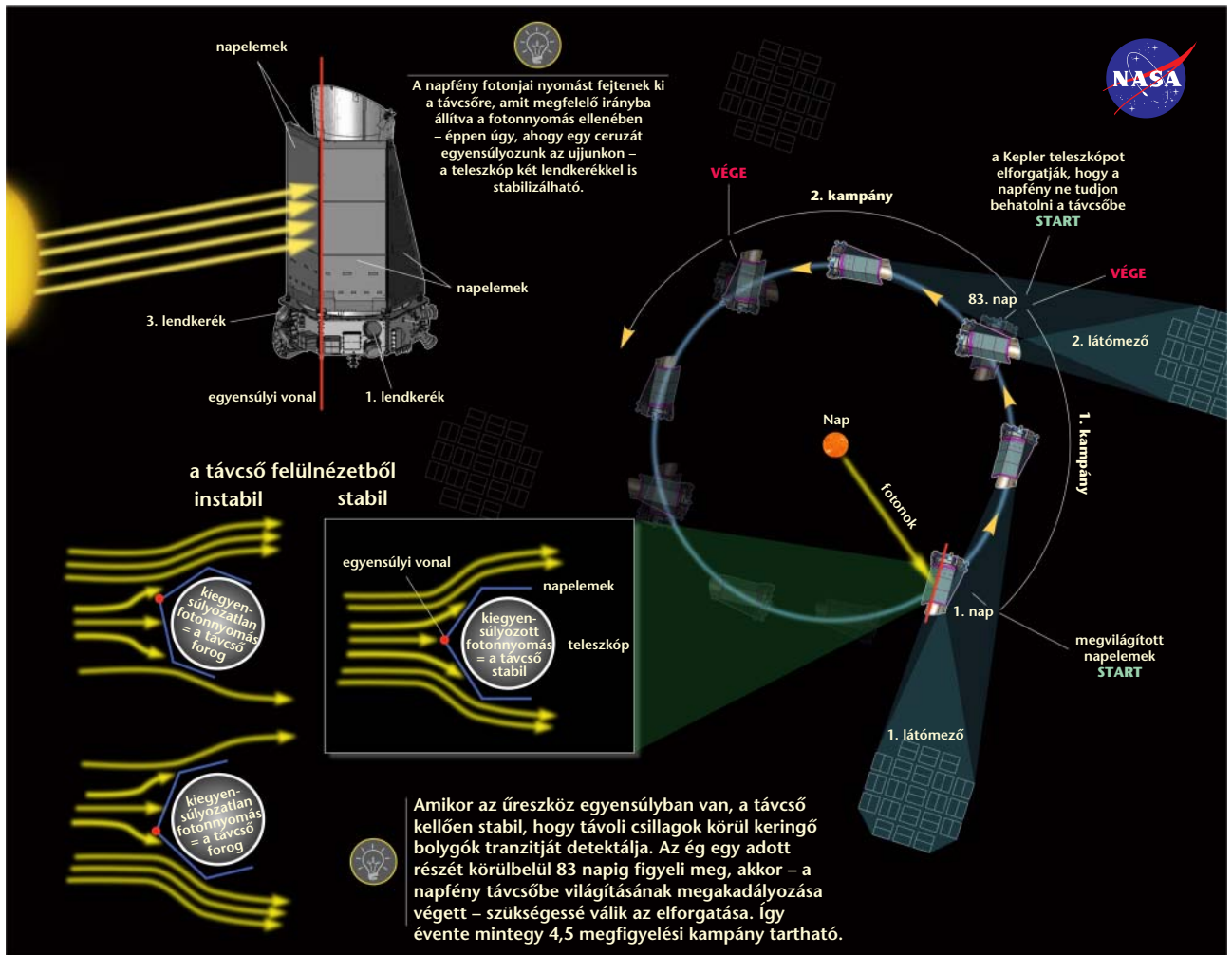


5. ábra. A Kepler által felfedezett első exobolygók Neptunusz és Jupiter méretű gázóriások voltak. A fénycsökkenés mértéke arányos a bolygó által kitart terület méretével (forrás: NASA/Kepler Mission).

A küldetés során olyan égitestek felfedezésére is sor került, amelyekre nem található példa a Naprendszerünkön belül [4]. Ilyenek a „szuperföldek” vagy a „mini-neptunuszok”, amelyek méretüket tekintve a Föld és a Neptunusz közötti tartományban találhatóak. Annak megállapítására, hogy gáz- vagy kőzetbolygóról van-e szó, az átlagsűrűségük, vagyis sugaruk és tömegük együttes ismeretére van szükség. A fotometriai úton detektált exobolygók esetében a fedés mélységéből a bolygósugár kiszámítható. Ehhez pusztán a csillag rádiuszának pontos ismeretére van szükség. Elméleti számítások szerint a kőzetbolygók mérete körülbelül 1,6 Föld-sugárig terjed, efelett inkább gázbolygó valószínűsíthető. A fotometriai méréseket a

7. ábra. A Föld „unokatestvére” tőlünk körülbelül 1400 fényévre kering egy, a Napunkhoz hasonló típusú, de annál 10%-kal nagyobb csillag körül. Zöld szín jelöli a lakhatósági zónát (forrás: NASA Ames/JPL-Caltech/T. Pyle & W. Stenzel).





8. ábra. A K2 küldetés látómezőjének kiválasztása mögött fizikai megfontolások álltak (forrás: NASA Ames/W. Stenzel).

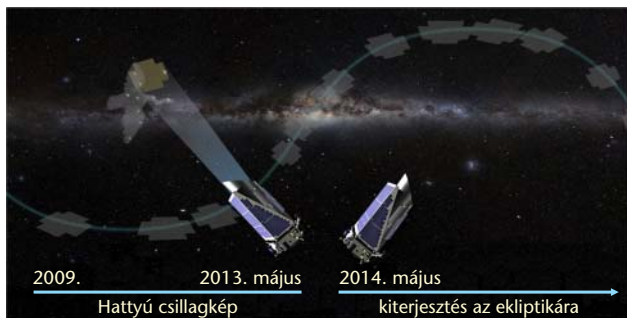
látóirányú (radiális) sebesség mérésével kiegészítve a bolygó tömegéről, ezek ismeretében pedig sűrűségéről is információt szerezhetünk. A Kepler nemcsak a bolygók, hanem a bolygórendszerek méretét illetően is sokrétű eredménnyel szolgált: skálája az egybolygóstól a nyolc planétát tartalmazó rendszerekig terjed (6. ábra) [5].

A NASA 2015-ben jelentette be egy olyan exobolygó felfedezését, amely hamarosan elnyerte a „Föld unokatestvére” címet. A Kepler-452b mérete és pályája sok hasonlóságot mutatott bolygónkéval. Földünkénél 1,6-szer nagyobb, amivel így a szuperföldek/mini-neptunuszok kategóriájába tartozik [6]. Csillaga a Napnál alig 10%-kal nagyobb és körülbelül 1 milliárd évvel idősebb. Az újonnan talált bolygó e – Napunkhoz hasonló – sárga törpecsillag lakhatósági zónáján belül kering, 385 napos periódussal (7. ábra). A két bolygó tehát sok mindenben hasonlít egymáshoz, azonban egy lényeges tulajdonságról még nincs információ: mégpedig arról, hogy a Kepler-452b a Földhöz hasonló kőzetbolygó-e, vagy sűrűsége alapján inkább a gázbolygókhoz hasonlatos. Lakhatósága szempontjából márpedig nem mellékes, hogy szuperföldről vagy mini-neptunusról van-e szó. Ezt az enigmát a bolygó detektálása óta nem sikerült feloldani.

A rendkívüli sikerek fényében a NASA 2012 áprilisában négy évvel meghosszabbította a küldetés időtartamát. A folytatás azonban nem úgy alakult, ahogyan bárki várta volna: 2013 tavaszára a távcső stabil pozicionálásáért felelős négy lendkerék közül kettő tönkrement, így a Kepler már nem tudta külső segítség nélkül az eredetileg kiválasztott terület megfigyelését végezni. Szükségessé vált a küldetés újragondolása, a megfigyelési mód totális átalakítása. E – kutatókat világszerte bevonó – szellemi erőfeszítés terméke lett a K2 küldetés.

Letérés a járt útról – a K2 misszió

A Kepler csapatára váró feladat egyszerűen megfogalmazható: egyensúlyban kell tartani a távcsövet, hogy az további mérések kivitelezésére alkalmas maradjon. Olyan módszer kiötlésére volt szükség, amely nem igényel mást, csupán a meglévő két lendkerék alkalmazását, lehetőleg minimális üzemanyag használatával. A megoldás pedig ott volt közvetlen a szemük előtt – mindössze 150 millió kilométerre. Egy leleményes elképzelés fogant meg a kutatók elméjében. A Nap fotonjai nyomást fejtenek ki az űreszközre, amely



9. ábra. A Kepler és a K2 küldetés során megfigyelt égiterek (forrás: NASA/ W. Stenzel).

forgatónyomatéket és a távcső elfordulását eredményezi. A távcső forgása azonban elkerülhető és a Kepler egyensúlyban tartható, ha a távcsövet olyan helyzetbe forgatják, hogy ez a forgatónyomaték minimális legyen [7]. Ahhoz hasonlatos manőver ez, mint amikor valaki ceruzát próbál egyensúlyozni az ujján. Ezt a konfigurációt akkor lehet megvalósítani, ha a Kepler tükrét elfordítja az első négy évben vizsgált terület felől – éppen az ekliptika síkjának irányába (8. ábra). Az egyensúly fenntartásához továbbá szükség volt a megfigyelési terület bizonyos időszakonként (körülbelül háromhavonta) történő megváltoztatására annak érdekében, hogy a távcső folyamatosan fenntarthassa kényes egyensúlyát. Ezenkívül, mivel instabil egyensúlyi állapotról beszélünk, a távcső lassan, majd egyre gyorsulva elkezd kitérni ebből az állapotból, amit hatóránként kompenzálni kellett a fedélzeti hajtóművek begyújtásával. A Kepler ilyenformán az ekliptikát pásztázta végig, minden 83 napos kampány során más területre fókuszálva (9. ábra).

Ebben a felállásban a távcső üzemanyaga még évekig elegendő maradt – változtatni kellett azonban a tudományos stratégián, hiszen a csillagjuktól távol (több hónapos, éves periódussal) keringő bolygók felfedezése gyakorlatilag lehetetlenné vált. Így az „egyszerű” exobolygóvadász Keplerből egy szerteágazó tudományos palettát átfogó, temérdek kérdéskört vizsgáló űreszköz lett.

A K2 programja

Ahol egy ajtó bezárul, ott egy másik kinyílik – tartja a mondás, és ez a Kepler esetében is igaznak bizonyult. Nem is egy, hanem temérdek új lehetőség előtt nyílt meg az út az új küldetéssel: a kutatók fantáziája volt az egyetlen, ami határt szabhatott. A K2 programjának meghatározásához a tudományos közösségből bárki pályázatot nyújthatott be. Ezen kutatási javaslatok közül választották ki az adott negyedévre vonatkozó mérési irányelveket, amelyek immáron nem korlátozódtak az exobolygók felfedezésére. Az új néven elstartoló K2 misszió céljai között egyaránt szerepeltek változócsillagok fényességmérései, fiatal csillagok és nyílthalmazok vizsgálata, naprendszerbeli objektumokat célzó felmérések, csakúgy, mint csillagok és galaxisok aktivitását vizsgáló mérések, csillagok belső

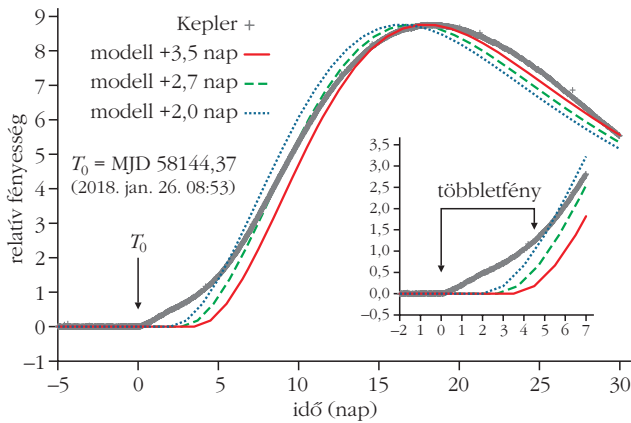
szerkezetét feltérképező asztroszeizmológiai kutatások, valamint szupernóva-robbanások fotometriai tanulmányozása. Magyar kutatók szorgalmazására került sor a Naprendszerünkben található, Neptunuszon túli kisbolygók fotometriai megfigyelésére [8]. Mindezek mellett természetesen továbbra is várták az újabb bolygók detektálását a Keplertől. A K2 során ugyanúgy fókuszba kerültek a fényes csillagok körül keringő planéták, mint az alacsony hőmérsékletű vörös törpecsillagok lakhatósági zónájában található exobolygók.

Élhető bolygók – haldokló csillagok

A Kepler a K2 során a lakható világok mellett ezek drasztikus ellentétét is vizsgálta: csillagok halálakor bekövetkező szupernóva-robbanásokat. Ezen folyamatoknak több fajtáját ismerjük: a nagy tömegű csillagok pusztulásakor végbemenő II-es típusú, valamint egy fehér törpecsillag felrobbanását kísérő Ia típusú szupernóvákat. A kozmológusok számára az utóbbiak kulcsfontosságú szerepet játszanak az Univerzum tágulási ütemének meghatározásában. Az Ia típusú robbanások eredete legalább egy, kettős rendszerben keringő fehér törpecsillaggal hozható összefüggésbe. A fehér törpék kis tömegű ($M < 8 M_{\text{Nap}}$) csillagok szénből és oxigénből álló maradványai, amelyek belsőjében a hőmérséklet nem éri el a szén begyulladásához szükséges értéket. A gyenge fúzióból származó sugárnyomás értéke nem elegendő, hogy egyensúlyt tartson a gravitációs összehúzóerővel. Az ilyen típusú objektumokban az elfajult elektrongáz nyomása kompenzálja a gravitáció kontrakciós hatását. Ia típusú szupernóva esetén egy fehér törpecsillag tömege valamilyen módon (például egy Roche-lebenyét kitöltő kísérőcsillagon keresztül, 10. ábra) akkorára nő, hogy megközelíti a Chandrasekhar-határt ($1,44 M_{\text{Nap}}$). E tömeg felett az ilyen csillagok nem maradhatnak egyensúlyban. Az egész objektum szétesésével és erős fényjelenséggel járó termonukleáris folyamat megy végbe. A tömeget felhalmozó fehér törpében beindul a szén égése, ami tovább növeli a maradványcsillag hőmérsékletét. Mivel az anyag elfajult (az

10. ábra. Az Ia típusú szupernóva-robbanás egyik lehetséges eredete egy Roche-lebenyét kitöltött vörös óriás kísérőről hidrogént akkretáló fehér törpe (forrás: NASA, JPL-Caltech).





11. ábra. A 2018oh jelű szupernóva korai időszakában detektált felfényesedés utalhat egy társcsillag jelenlétére (forrás: csillagaszat.hu).

elektronok nyomása nem függ a hőmérséklettől), a fehér törpe nem tudja szabályozni saját fúziós folyamatait a tágulás és az ezzel járó hűlés útján. Ennek következtében – pozitív visszacsatolással – további fúziós reakciók indukálódnak. A folyamat végigsöpör az egész fehér törpén, és végül az objektum teljes felbomlásához vezet. Mivel az Ia típusú szupernóvák mindig hasonló tömegnél következnek be, a robbanás luminozitása (abszolút fényessége) is azonos. Emiatt *standard gyertyaként* (azaz az objektum távolságának meghatározására) alkalmazhatók. A valóság ennél természetesen bonyolultabb – nem ismerjük például pontosan a detonáció kiváltó okát –, így a szupernóvák fénygörbéinek minél precízebb kalibrációjára van szükség.

Az ilyen tranzienis jelenségek bekövetkeztének megjósolása jelenleg nem lehetséges. Éppen emiatt folyamatos, hosszan tartó megfigyelésre van szükség a szupernóvák detektálásához. Az is lényeges, hogy ezeket a jelenségeket minél korábban, a robbanás kezdetétől tudjuk megfigyelni, a fényesség változását pedig minél precízebben legyünk képesek megmérni. Így lehetőség nyílik a felrobbanó rendszerre vonatkozó ismereteink bővítésére is. Kepler/K2 éppen ilyen adatokat volt képes szolgáltatni. Jelenleg két domináns elmélet vetekedik egymással, amelyek alapfeltevései az alábbiak:

- Egy vörös óriáscsillagból és egy fehér törpéből álló kettős rendszerben az óriáscsillagról a törpecsillagra áramló anyag idézi elő a robbanást.
- A szupernóvát két fehér törpe összeolvadása okozza.

Annak reményében, hogy bepillantást nyerhetünk ezen egzotikus folyamatok háttérébe, a Kepler-űrtávcső rendkívüli pontosságú fotometriai méréseit földi távcsövek megfigyeléseivel egészítették ki. Ez utóbbi vizsgálatok a rendszer kémiai összetételéről és színéről nyújtottak információt a robbanás során. Ezzel olyan tudás birtokába juthattunk, amely – ha nem is oldja fel véglegesen a rejtélyt – segítséget nyújthat az Ia szupernóvák természetének megismeréséhez.

A 2018oh jelű szupernóva fénygörbéjét tanulmányozva egy különös jelenségre lettek figyelmesek a

kutatók. Míg egy hasonló robbanás felfényesedése körülbelül három héten keresztül zajlik, addig a 2018oh esetén ez mindössze néhány napba telt (11. ábra). A földi megfigyelések azt is kiderítették, hogy ebben az időszakban a szupernóva kék színben fénylett (ez a magasabb hőmérsékletek indikátora). A Kepler mérései alapján már a robbanás első pillanataitól kezdve rendelkezünk információval a szupernóva fényességéről. Adatokban tehát nem volt hiány – a következő lépés az elmélet megalkotása volt. Néhány kutató arra az eredményre jutott, hogy a megfigyeléseket alátámasztaná a vörös óriás kísérőcsillagot számításba vevő elképzelés. Feltevésük szerint a felrobbanó fehér törpétől származó lökeshullám nekiütöközt a társcsillagnak, ezzel rendkívüli módon felmelegítve annak anyagát: ez magyarázza a tapasztalt magas hőmérsékletet és erős fényjelenséget [9]. Más kutatók viszont nagy mennyiségű radioaktív nikkelt bomlásával magyarázták a tapasztalt felfényesedést. Habár a Kepler sem hozott döntő bizonyítékot az Ia szupernóvák eredetéről zajló vitában, egy lépéssel mégis közelebb kerülhettünk ezen egzotikus jelenségek működésének megértéséhez.

Az amatőr légió

A Kepler-misszió lehetőséget biztosított arra is, hogy ne csak a hivatásszerűen csillagászként dolgozó kutatók nyerjenek bepillantást a távcső által mért adatokba, hanem bárki, aki részese kívánt lenni az exobolygókra irányuló kutatásoknak. E „Citizen Scientist” program keretén belül a lelkes amatőrök akár otthonról vizsgálhatták a fénygörbéket. A program a Planet Hunters nevet kapta [10]. Mindennek azért volt jelentősége, mert a bolygókereső algoritmusok sem képesek kiszűrni minden tranzitot. Az algoritmusok által nem észlelt, de a fénygörbében valójában jelen lévő bolygóátvonulások detektálásához – a nagy adatmennyiséghez mérten – nagy számú kutató közreműködésére volt szükség. Kiváló megoldásnak bizonyult erre a Planet Hunters kezdeményezés, amely lehetővé tette a rengeteg fénygörbe emberi átvizsgálását. A program sikerét mutatja, hogy mindössze két héttel az indítása után, a Föld különböző tájairól már több mint tízezren vettek részt az exobolygó-vadászatban. E kezdeményezés érdeme a K2-128 sokbolygós rendszer felfedezése is, amelynek csillaga körül 5 planéta kering. A detektálás 2017-ben történt, és ez volt az első, teljes mértékben a publikum segítségével felfedezett multiplanetáris csillagrendszer.

A fényesség csökkenését természetesen más jelenség is okozhatja egy csillaga körül keringő exobolygón túl. Ilyen lehet például egy pulzáló változócsillag, amelynek fényessége a csillag sugarának növekedése-csökkenése hatására változik, vagy egy kettős csillagrendszer is. Sőt olyan eset is előfordulhat, amikor a fényesség változása nem sorolható be semmilyen általunk ismert folyamat közé. Ezek a jelenségek, habár a csillagászat más tájékán fontos mérési alapot szolgál-

tathatnak a kutatáshoz, az exobolygósűrítő programok számára észrevétlenek maradnak. Érdekes példa volt erre a – szintén közösségi erőfeszítések segítségével felfedezett – „Boyajian-csillag”. Ennek különös viselkedésére a bolygóvadászok bukkantak rá (12. ábra). Különlegessége abban rejlett, hogy a fényesség napokig tartó, drasztikus csökkenését nem lehetett megmagyarázni sem egy exobolygó, sem egy társ-csillag keringésével, de a csillag pulzációjából fakadó változást is ki lehetett zárni. Sorra születtek a jelenséget magyarázni próbáló elméletek: egyesek üstökösrajjal, míg mások egy gyűrűs bolygó és aszteroidák jelenlétével igyekeztek indokolni a furcsa fényességcsökkenéseket. A legextrémebb magyarázat egy idegen megastruktúra (úgynevezett Dyson-szféra) létezését okolta a látottakért. Egy sokkal valószínűbb elmélet szerint a különös viselkedést a csillag körüli porgyűrű jelenléte okozhatja [11]. A konklúzió egyelőre várat magára, ám egy biztos: ez a rejtély is megbújt volna az algoritmusok radarja alatt a lelkes amatőr kutatók segítségével nélkül.

A Kepler évtizede

A Kepler több mint kilenc és fél éven át tartó, korszakalkotó felfedezésekben és meglepő eredményekben egyaránt bővelkedő mérési időszaka 2018. október 30-án ért véget. Ezen a napon végleg kifogyott a távcső pozíciójának tartásáért felelős rakéták üzemanyaga és megkezdődött a teleszkóp leállításának folyamata. A NASA november 15-én – éppen *Johannes Kepler* halálának évfordulóján – küldte el a Kepler számára utolsó, úgynevezett „Jó éjt!” parancsát. Működése során a távcső összesen több mint 2700 exobolygó detektálását tette lehetővé (ebből 360-at a K2 misszió során találtak), és ezek száma a mai napig nő, amint egyre több bolygójelölt kerül át a „megerősített” kategóriába. A küldetés egy évtizede alatt bolygók és bolygórendszerek széles skálájába engedett betekintést nekünk a Kepler, és választ hozott az exobolygók kutatók legégetőbb kérdéseire is [12]. Hála a távcső példátlan pontosságának, a misszió mögött álló fáradhatatlan kutatógárdának és a lelkes amatőr résztvevők tevékenységének, a Kepler megreformálta az exobolygókról alkotott nézeteinket és egy új korszak kapuját nyitotta meg előttünk. A küldetés eredményezte a Naprendszeren kívül ismert legtöbb bolygót tartalmazó bolygórendszer felfedezését is, ahol a központi csillag körül nyolc bolygó kering. Rendkívül pontos fotometriai képességeinek és a kutatók leleménységének köszönhetően



12. ábra. A Boyajian-csillag furcsa fényességváltozását egy csillagtól távoli porgyűrű okozhatja, ami egy szétesett bolygóból származhat (forrás: NASA, JPL-Caltech).

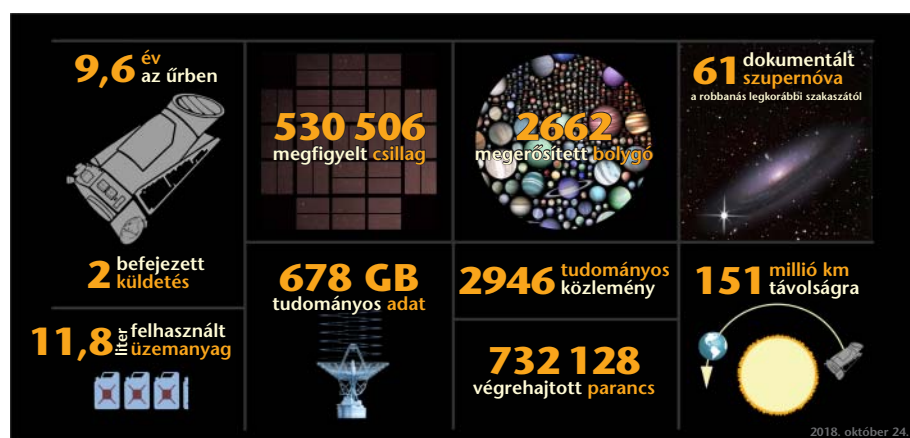
kitűzött célját többszörösen felülmúlva szupernóvakat, naprendszerbeli objektumokat, távoli kvazárokat, változó, aktív és kettőscsillagokat érintő kérdésekben is nagy jelentőséggel bíró adatokhoz juthattunk hozzá (13. ábra). A K2 küldetés kiváló példája volt annak, hogyan képes a kutatóközösség előnyt kovácsolni egy előre nem látott problémából.

A Kepler története azonban még nem ért véget, terjedelmes mennyiségű adatának és az idáig meg nem erősített több mint 2000 bolygójelöltjének analízisére továbbra is zajlik. A Kepler álomba szenderülése után is megoldandó rejtélyek és újabb kihívások elé állítja a kutatókat. Az exobolygók felfedezése sem ért a végére, sőt még csak a legelején járunk e generációkon átívelő történetnek. A stafétát a TESS űrtávcső vette át nagymúltú elődjétől, amely 2019 júliusában fejezte be a déli égbolt feltérképezését, és kezdte az északi területek átfésülését. Ám akárhová vezesse is a világ kutatóit ez a feltérképezetlen útvesztő, akármilyen megdöbbentő eredmények birtokába jussunk is az exobolygók változatos világával kapcsolatban, mindenki emlékezni fog rá: a Kepler járt itt először.

Irodalom

1. Szabó R.: Bolygóáradat és asztroszeizmológia – Elindult a Kepler-űrtávcső. *Fizikai Szemle* 59/4 (2009) 121–126.
2. Szabó M. Gy., Simon A., Szalai T.: Újdonságok az exobolygók világából. *Fizikai Szemle* 61/7–8 (2011) 217–222.

13. ábra. A Kepler kilenc és fél éves küldetésének összegzése számokban (forrás: NASA/Ames Research Center/W. Stenzel).



3. L. R. Doyle, J. A. Carter, D. C. Fabrycky és mtsai: Kepler-16: A Transiting Circumbinary Planet. *Science* 333 (2011) 1602–1606.
4. Szabó R., Szabó M. Gy.: Kepler-bolygók kavalkádja. *Fizikai Szemle* 63/7–8 (2013) 217–222.
5. C. J. Shallue, A. Vanderburg: Identifying Exoplanets with Deep Learning: A Five Planet Resonant Chain around Kepler-80 and an Eighth Planet around Kepler-90. *The Astronom. J.* 155 (2018) ID 194, 21 pp.
6. J. M. Jenkins, J. D. Twicken, N. M. Batalha és mtsai.: Discovery and Validation of Kepler-452b: A 1.6 R_{\oplus} Super Earth Exoplanet in the Habitable Zone of a G2 Star. *The Astronom. J.* 150 (2015) ID56, 19 pp.
7. Molnár L: Kepler: a kötéláncos űrtávcső. *Fizikai Szemle* 64/6 (2014) 182–187.
8. A. Pál, R. Szabó, M. Gy. Szabó és mtsai.: Pushing the limits: K2 observations of the trans-Neptunian objects 2002 GV₃₁ and (278361) 2007 JJ₄₃. *The Astrophys. J. Lett.* 804 (2015) L45, 5 pp.
9. W. Li, X. Wang, J. Vinkó és mtsai: Photometric and Spectroscopic Properties of Type Ia Supernova 2018oh with Early Excess Emission from the Kepler 2 Observations. *The Astrophys. J.* 870 (2019) ID12, 33 pp.
10. Planet Hunters: <https://www.zooniverse.org/projects/nora-dot-eisner/planet-hunters-tess>
11. H. Y. A. Meng, G. Rieke, F. Dubois és mtsai: Extinction and the Dimming of KIC 8462852. *The Astrophys. J.* 847 (2017) ID131, 10 pp.
12. T. Bovaird, C. H. Lineweaver, S. K. Jacobsen: Using the inclinations of Kepler systems to prioritize new Titius–Bode-based exoplanet predictions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 448 (2015) 3608–3627.